

# SIMULASI KOMPUTER MODEL PERPINDAHAN MASSA UAP AIR DALAM UDARA PADA KOLOM ADSORBSI DENGAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN BEDA HINGGA

**Degi Yonathan R.T. (L2C306020) dan Muh. Anugerah Achsan (L2C306020)**

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jln. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, 50239, Telp/Fax: (024)7460058  
Pembimbing: Dr. Ir Setia Budi Sasongko, DEA

## Abstrak

*Proses pengeringan udara dengan menggunakan zeolit merupakan salah satu peristiwa adsorpsi. Pada peristiwa adsorpsi terdapat model perpindahan massa gas yang memiliki beberapa variable/parameter yang belum diketahui. Tujuan penelitian ini adalah menyusun rangkaian kode komputer untuk menyelesaikan model perpindahan massa gas, validasi model dengan data-data yang ada (Sumber : Arya et al, 2006), dan penentuan besarnya koefisien perpindahan massa gas-padat dan konstanta henry. Variabel proses yang digunakan adalah variasi tinggi bahan isian (zeolit) dan variasi kecepatan aliran udara. Persamaan differensial parsial diubah menjadi persamaan diferensial ordiner dengan metode beda hingga dan diselesaikan dengan metode runge-kutte dan SSE (Sum Square Error) menggunakan matlab. Model matematis perpindahan massa pada adsorpsi dapat diselesaikan dengan menggunakan program Matlab untuk mendapatkan distribusi konsentrasi uap air dalam udara sebagai fungsi waktu, tinggi bahan isian dan kecepatan aliran udara, serta koefisien perpindahan massa overall sebagai fungsi tinggi bahan isian dan kecepatan aliran udara.*

**Kata kunci:** beda hingga, adsorpsi, koefisien perpindahan massa.

## Abstract

*Air drying process by using zeolit is one of adsorption phenomenon. In this adsorption ,gas mass transfer model has some unknown variable/parameter. The aim of this study is to arrange series of computer code to solve gas mass transfer model, to validate models with aviable date (Arya et al, 2006), and to determine the valve of gas solid mass transfer and Henry constant. Process variable which being used are packing height (zeolit) and air flow rate. Partial difference equation was change into ordinary differential equation with finite difference method and solved by Runge - kutta and SSE (some square error) method using MATLAB. Mass transfer mathematic model in adsorption can be solved using matlab program to obtain vapour concentration distribution in air as a function of time., packing height and air flow rate and overall mass transfer coefficient as a function of packing height and air stream rate.*

**Key Words:** finite difference, adsorption, coefficient mass transfer

## 1. Pendahuluan

Peristiwa transfer massa adalah salah satu pengetahuan dasar yang penting dan banyak sekali dijumpai dalam persoalan teknik kimia, disamping transfer panas dan transfer momentum. Transfer massa ini dapat berupa transfer massa padat-cair, cair-cair, gas-gas, dan padat-gas.

Sebagai seorang *engineer* pengetahuan tentang jenis, operasi, dan variabel-variabel perancangan mutlak harus dimiliki, dimana kemampuan itu meliputi *soft skill* dan *technical skill*. *Soft skill* meliputi kemampuan untuk menentukan variabel-variabel perancangan, pertimbangan desain, *engineering judgement* yang akan lebih tajam apabila diimbangi dengan *technical skill* yang meliputi penggunaan *Chemical Engineering Tools* dalam persoalan-persoalan Teknik Kimia yang termasuk perhitungan dengan cara analitis maupun pendekatan numeris dengan menggunakan *hand calculation* ataupun dengan bantuan *soft ware* pemrograman seperti basic, matlab, hysis, dan lain-lain.

Dalam proses adsorpsi perpindahan massa dari fase gas ke fase cair merupakan salah satu hal yang menentukan. Dalam kinerja alat perpindahan massa terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi di kedua titik.

Namun perpindahan massa disetiap titik atau segmen sulit untuk diamati, sehingga perlu suatu model yang mampu mendiskripsikan distribusi konsentrasi uap air tersebut. Dari model perpindahan massa dapat disimulasikan dinamika konsentrasi uap air disetiap titik. Akhirnya dapat diperoleh variable-variable optimum proses seperti kga, konstanta henry (H), laju alir cairan yang sangat diperlukan dalam perancangan adsorpsi.

Adsorpsi adalah proses pemisahan di mana komponen tertentu dari suatu fasa fluida berpindah ke permukaan zat padat yang menyerap (adsorben). (Mc Cabe dkk, 1989)

Perancangan adsorber dapat ditentukan dari beberapa faktor sebagai berikut :

1. jumlah fluida yang mengalir per satuan waktu.
2. jumlah bahan baku yang akan diadsorpsi.
3. kapasitas penyerapan pada adsorben.
4. penurunan tekanan yang diijinkan melalui bahan isian.
5. waktu adsorpsi dalam satu proses.
6. waktu yang dibutuhkan untuk kembali aktif, purging, dan lain-lain.

Secara komersial biasanya proses adsorpsi ini berjalan dalam suatu unggun (bed/adsorbent) yang mengadsorpsi solute dari fluida. Hal ini dilakukan sampai unggun menjadi jenuh (ditandai dengan tidak berubahnya konsentrasi solute pada fluida masuk dan keluar). Kemudian proses dihentikan dan unggun digenerasi untuk digunakan lagi. Secara umum tipe adsorpsi ada dua macam yaitu Physical adsorption/Van Der Waal Adsorption dan Chemical adsorption

Proses adsorpsi terjadi pada permukaan pori-pori dalam butir adsorben, sehingga untuk bisa teradsorpsi, uap air dari udara mengalami proses-proses seri sebagai berikut:

1. Perpindahan massa dari udara ke permukaan butir.
2. Difusi dari permukaan butir ke dalam butir melalui pori.
3. Perpindahan massa dari udara dalam pori ke dinding pori.
4. Adsorpsi pada dinding pori.

Perpindahan massa dari udara ke permukaan butir dengan persamaan sebagai berikut :

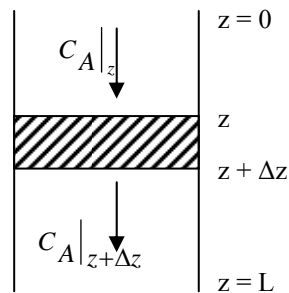
$$N_A = k_{ca} (C_A - C_A^*) \quad (1)$$

Hubungan kesetimbangan adsorpsi padat-gas dapat dituliskan sebagai berikut :

$$C_A^* = H \cdot X_A \quad (2)$$

Difusi dari permukaan butir ke dalam butir melalui pori dengan persamaan sebagai berikut :

$$N_A = -D_e \cdot A \cdot \frac{dC_A}{dz} \quad (3)$$



Gambar 1. Elemen volume bahan isian dalam operasi *fixed bed*

Neraca massa uap air pada fase gas untuk elemen setebal  $\Delta z$

*Rate of Input – Rate of Output = Rate of Accumulation*

$$\left( -D_e \cdot A \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_z + F \cdot C_A \Big|_z \right) - \left( -D_e \cdot A \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_{z+\Delta z} + F \cdot C_A \Big|_{z+\Delta z} + k_{ca} \cdot (C_A - C_A^*) \cdot A \cdot \Delta z \right) = A \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (4)$$

Dibagi dengan  $(D_e \cdot A \cdot \Delta z)$ , persamaan (4) menjadi :

$$\left( \frac{\frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_{z+\Delta z} - \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_z}{\Delta z} \right) - \left( \frac{F}{D_e \cdot A} \cdot \frac{C_A \Big|_{z+\Delta z} - C_A \Big|_z}{\Delta z} \right) - \frac{k_c a}{D_e} \cdot (C_A - C_A^*) = \frac{\varepsilon}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (5)$$

Jika diambil limit  $\Delta z \rightarrow 0$ , maka berdasar definisi matematika, diperoleh:

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} - \left( \frac{F}{D_e \cdot A} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) - \frac{k_c a}{D_e} \cdot (C_A - C_A^*) = \frac{\varepsilon}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (6)$$

Jika persamaan (6) disederhanakan dan dimana  $F=v \cdot A$ , maka persamaannya akan menjadi:

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} - \left( \frac{v}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) - \frac{k_c a}{D_e} \cdot (C_A - C_A^*) = \frac{\varepsilon}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (7)$$

Neraca massa uap air teradsorpsi dalam adsorben dalam elemen volume:

*Rate of Input – Rate of Output = Rate of Accumulation*

$$k_c a \cdot (C_A - C_A^*) \cdot A \cdot \Delta A - 0 = \frac{A \cdot \Delta z \cdot \rho_b}{18} \cdot \frac{\partial x_A}{\partial t} \quad (8)$$

Jika dilakukan penyederhanaan, maka diperoleh

$$\frac{\partial x_A}{\partial t} = \frac{k_c a \cdot 18}{\rho_b} \cdot (C_A - C_A^*) \quad (9)$$

Penyelesaian persamaan differensial tersebut dapat diselesaikan secara numerik dengan metode *finite difference* (beda hingga). Hasil penyelesaian persamaan tersebut adalah harga koefisien transfer massa  $k_c a$ , Difusivitas efektif  $D_e$  dan konstanta kesetimbangan  $H$ .

Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan model perpindahan massa gas, menyusun rangkaian kode computer untuk menyelesaikan model, validasi model dengan data-data yang ada, menentukan besarnya koefisien perpindahan massa gas-padat dan konstanta Henry.

## 2. Pengembangan Model

Pada penelitian ini digunakan variabel tetap yaitu diameter partikel 0,0912 cm, dan konsentrasi uap air mula-mula dalam umpan dalam udara yaitu 1,21 ppm. Sedangkan variabel berubah yang digunakan adalah tinggi bahan isian (zeolit) yaitu 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm, dan 14 cm dan kecepatan aliran udara 44,98 cm/det, 56,59 cm/det, 59,49 cm/det, 60,94 cm/det, dan 62,4 cm/det. Adapun respon yang diamati adalah konsentrasi uap air dalam udara pada waktu 0, 5, 10, 15, dan 20 menit dengan tinggi bahan isian dan kecepatan aliran udara tertentu.

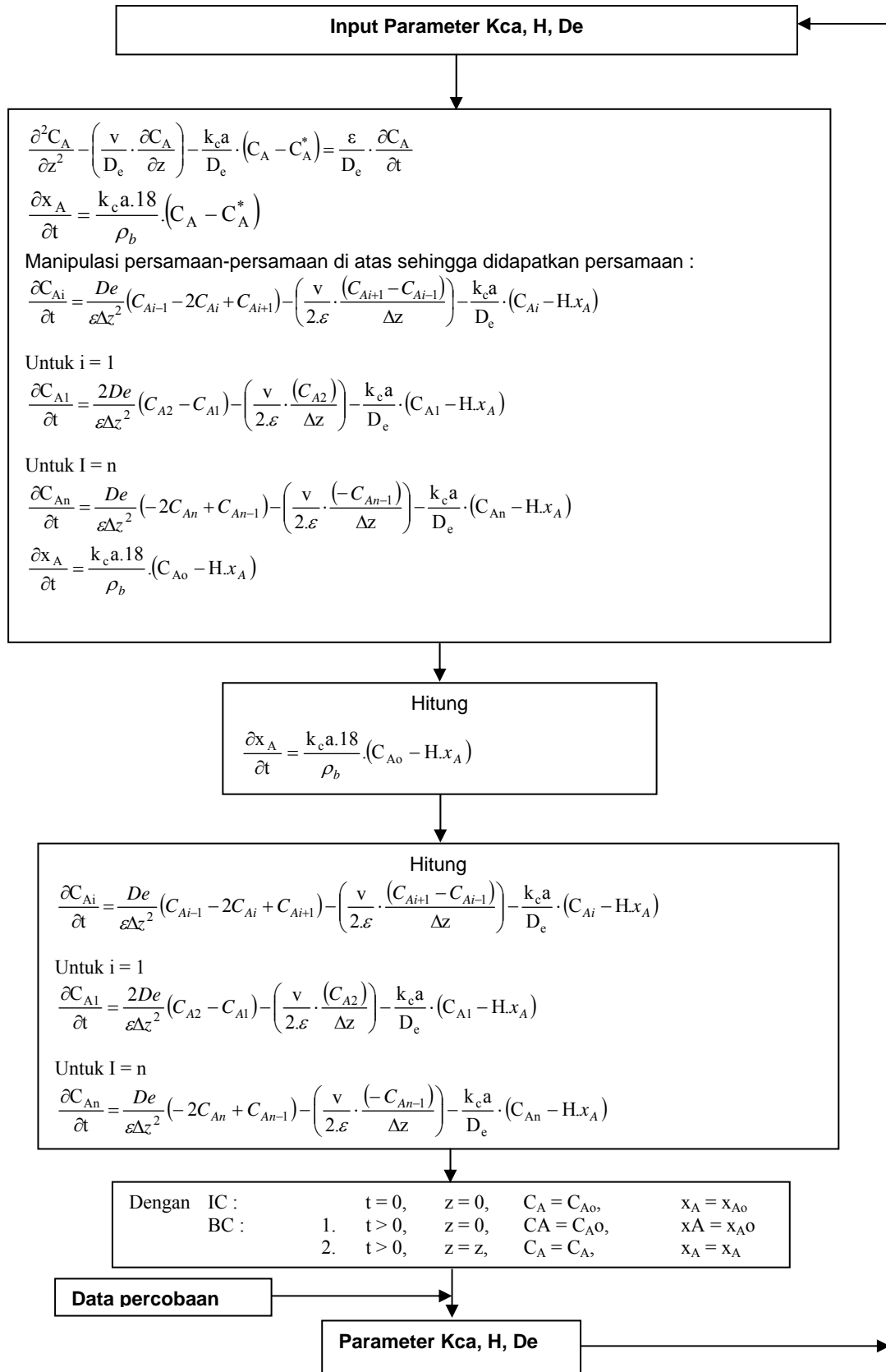
Karakteristik adsorpsi diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Arya et al (2006). Hasil pengembangan model matematik adsorpsi merupakan sistem persamaan diferensial parsial yang kemudian diubah menjadi persamaan diferensial ordiner dengan Metode Beda Hingga dan diselesaikan menggunakan Metode Runge-Kutte. Program computer untuk pemodelan ini menggunakan Matlab (Penyelesaian numerik)

Neraca massa uap air pada fase gas untuk elemen setebal  $\Delta z$

*Rate of Input – Rate of Output = Rate of Accumulation*

$$\left( -D_e \cdot A \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_z + F \cdot C_A \Big|_z \right) - \left( -D_e \cdot A \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_{z+\Delta z} + F \cdot C_A \Big|_{z+\Delta z} + k_c a \cdot (C_A - C_A^*) \cdot A \cdot \Delta z \right) = A \cdot \Delta z \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (10)$$

### Bagan Alir Pelaksanaan Penelitian



$$\left( \frac{\frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_{z+\Delta z} - \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_z}{\Delta z} \right) - \left( \frac{F}{D_e \cdot A} \cdot \frac{C_A \Big|_{z+\Delta z} - C_A \Big|_z}{\Delta z} \right) - \frac{k_c a}{D_e} \cdot (C_A - C_A^*) = \frac{\varepsilon}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} - \left( \frac{F}{D_e \cdot A} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) - \frac{k_c a}{D_e} \cdot (C_A - C_A^*) = \frac{\varepsilon}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} - \left( \frac{v}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) - \frac{k_c a}{D_e} \cdot (C_A - C_A^*) = \frac{\varepsilon}{D_e} \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (13)$$

Neraca massa uap air teradsorpsi dalam adsorben dalam elemen volume:

*Rate of Input – Rate of Output = Rate of Accumulation*

$$k_c a \cdot (C_A - C_A^*) \cdot A \cdot \Delta A - 0 = \frac{A \cdot \Delta z \cdot \rho_b}{18} \cdot \frac{\partial x_A}{\partial t} \quad (14)$$

$$\frac{\partial x_A}{\partial t} = \frac{k_c a \cdot 18}{\rho_b} \cdot (C_A - C_A^*) \quad (15)$$

Persamaan-persamaan di atas didasarkan pada beberapa asumsi, yaitu Butiran zeolit tersebar merata ke dalam kolom, distribusi kecepatan aliran fluida dianggap sama pada seluruh penampang kolom, perpindahan massa arah radial nilainya kecil sehingga perpindahan massa tersebut diabaikan, uap air dalam udara dianggap gas ideal, dan proses berlangsung secara isothermal. Selanjutnya persamaan diubah menjadi persamaan-persamaan diferensial ordiner secara numeric menggunakan metode beda hingga dan diselesaikan dengan metode Runge-Kutte menggunakan software Matlab.

Untuk validasi Program Simulasi, hasil perhitungan dibandingkan dengan data hasil penelitian oleh Arya et al (2006). Nilai konsentrasi setiap waktu terhadap panjang lintasan bahan isian diperoleh dengan cara trial nilai Henry, Kc dan De. Kemudian hasilnya dicocokkan dengan data hasil penelitian oleh Arya et al (2006).

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini dibandingkan antara hasil penelitian di laboratorium yang dilakukan oleh arya et al. dengan hasil pemrograman dengan menggunakan MATLAB. Persamaan differensial diselesaikan secara numerik dengan metode *finite difference* (beda hingga) dengan menggunakan program MATLAB.

Tabel 1. Data hasil penelitian laboratorium untuk variable ketinggian

Z (cm)	C <sub>A</sub> (ppm)				
	0 menit	5 menit	10 menit	15 menit	20 menit
6	1,21	0,326	0,423	0,855	0,688
8	1,21	0,312	0,306	0,423	0,504
10	1,21	0,325	0,220	0,327	0,412
12	1,21	0,354	0,246	0,373	0,318
14	1,21	0,312	0,314	0,231	0,234

(Sumber : Arya et al, 2006)

Tabel 2. Data hasil penyelesaian menggunakan program untuk variable ketinggian

Z (cm)	C <sub>A</sub> (ppm)					k <sub>c</sub> a (1/det)	De (cm <sup>2</sup> /det)	Konstanta Henry
	0 menit	5 menit	10 menit	15 menit	20 menit			
6	1,21	0,925	0,709	0,528	0,384	1,37E-3	3,41E-3	1,37E-6
8	1,21	0,676	0,356	0,181	0,123	1,40E-3	4,49E-3	1,52E-6
10	1,21	0,587	0,253	0,129	0,0683	1,41E-3	4,80E-3	1,44E-6
12	1,21	0,598	0,263	0,132	0,0767	1,50E-3	4,92E-3	1,43E-6
14	1,21	0,579	0,242	0,124	0,0629	1,51E-3	5,17E-3	1,39E-6

Tabel 3. Sum Square Error untuk variable ketinggian

Z (cm)	SSE
6	6,4229E-6
8	3,3974E-6
10	2,2703E-6
12	1,7607E-6
14	1,1706E-6

Tabel 4. Data hasil penelitian laboratorium untuk variable laju alir

V (cm/det)	C <sub>A</sub> (ppm)				
	0 menit	5 menit	10 menit	15 menit	20 menit
44,98	1,22	0,386	0,439	0,640	0,782
56,59	1,22	0,511	0,782	0,936	0,827
59,49	1,22	0,479	0,800	0,104	0,965
60,94	1,22	0,261	0,698	0,568	0,586
62,40	1,22	0,312	0,306	0,504	0,423

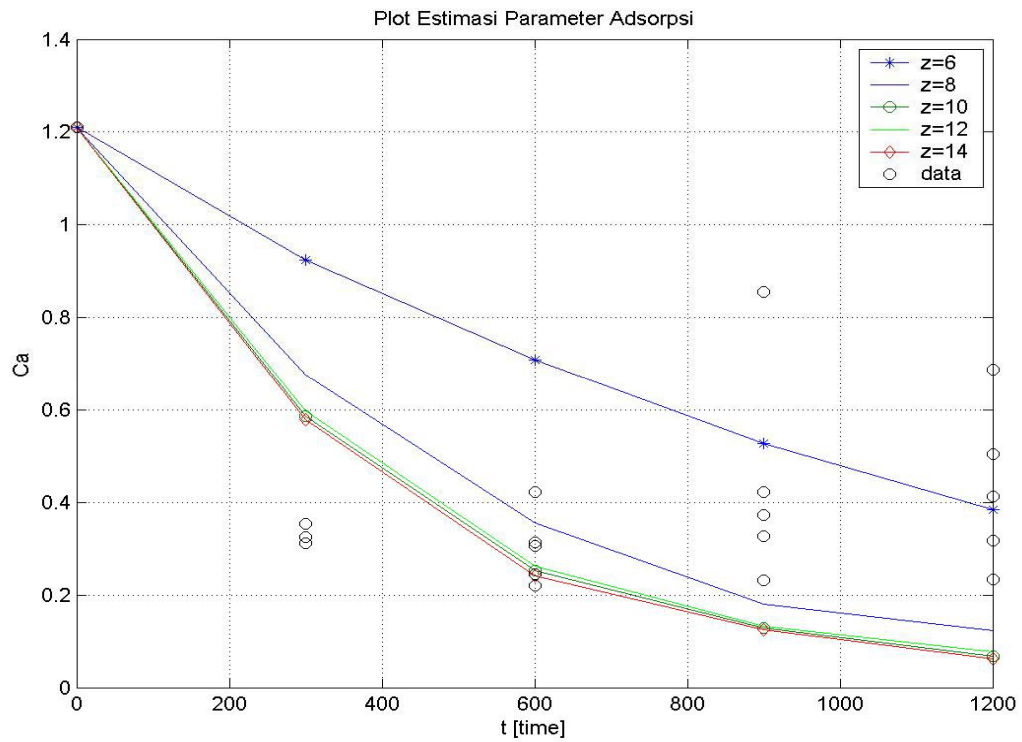
(Sumber : Arya et al, 2006)

Tabel 5. Data hasil penyelesaian menggunakan program untuk variable laju alir

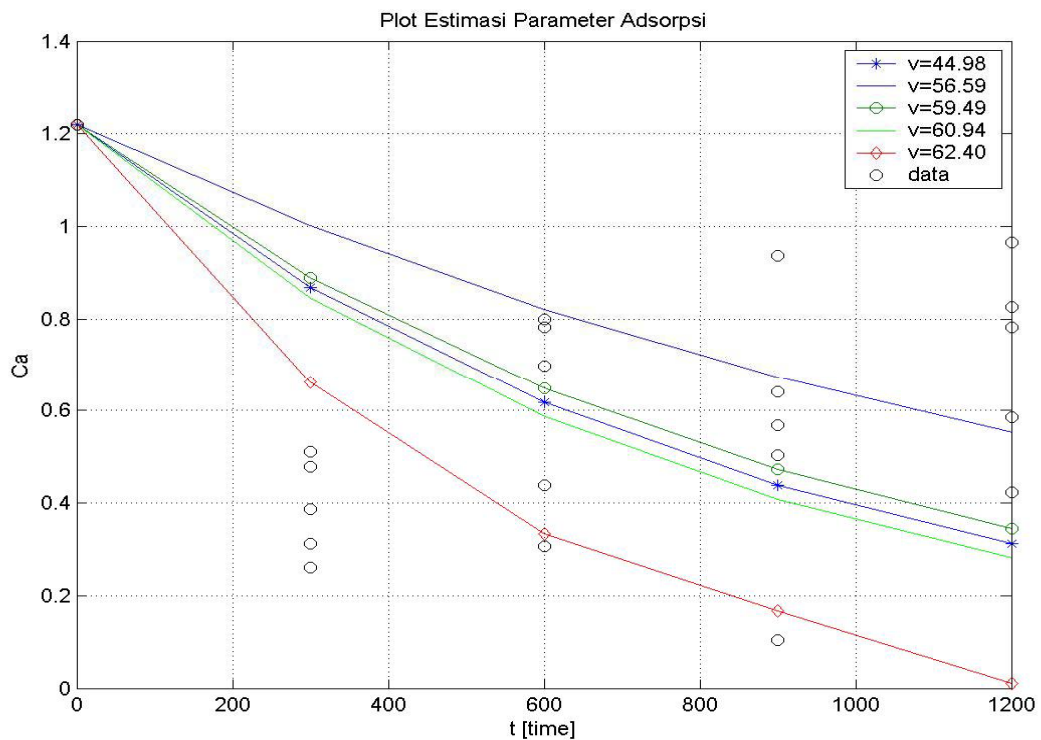
V (cm/det)	C <sub>A</sub> (ppm)					k <sub>ca</sub> (1/det)	De (cm <sup>2</sup> /det)	Konstanta Henry
	0 menit	5 menit	10 menit	15 menit	20 menit			
44,98	1,22	0,868	0,618	0,439	0,313	1,18E-3	3,27E-3	1,60E-6
56,59	1,22	1,001	0,821	0,673	0,552	1,36E-3	3,24E-3	1,46E-6
59,49	1,22	0,889	0,648	0,472	0,344	1,37E-3	3,58E-3	1,68E-6
60,94	1,22	0,846	0,587	0,407	0,282	1,36E-3	3,71E-3	1,51 E-6
62,40	1,22	0,662	0,333	0,167	0,0114	1,50E-3	4,67E-3	1,32E-6

Tabel 6. Sum Square Error untuk variable laju alir

V (cm/det)	SSE
44,98	5,3775E-5
56,59	3,7053E-5
59,49	6,7698E-5
60,94	4,6464E-5
62,40	3,3226E-5



**Gambar 1. Profil konsentrasi uap air dalam udara untuk variabel ketinggian**



**Gambar 2. Profil konsentrasi uap air dalam udara untuk variabel laju alir**

Dari hasil dengan menggunakan program untuk variabel ketinggian dimana semakin tinggi bahan isian maka konsentrasi uap air dalam udara akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya waktu, untuk variabel laju alir dapat dilihat bahwa semakin cepat laju alir maka konsentrasi uap air dalam udara akan semakin kecil seiring

dengan bertambahnya waktu, sedangkan data hasil dari laboratorium menunjukkan konsentrasi uap air dalam udara menunjukkan fluktuasi dengan bertambahnya waktu. Hal ini disebabkan karena penelitian dilaboratorium, banyak dipengaruhi oleh kondisi-kondisi operasi pada saat melakukan penelitian, sedangkan penelitian dengan program tidak dipengaruhi oleh kondisi-kondisi tersebut. Selain itu adanya asumsi-asumsi dalam penyusunan model matematis juga menyebabkan terjadinya perbedaan dengan hasil dari laboratorium. Dari hasil juga diperoleh bahwa dengan bertambahnya ketinggian bahan isian dalam kolom adsorpsi maka koefisien transfer massa akan semakin besar. Ini disebabkan karena semakin tinggi bahan isian dalam kolom adsorpsi maka uap air yang terserap dalam bahan isian akan semakin banyak.

#### 4. Kesimpulan

Model matematis perpindahan massa pada adsorpsi dapat diselesaikan dengan menggunakan program Matlab untuk mendapatkan distribusi konsentrasi uap air dalam udara sebagai fungsi waktu, tinggi bahan isian dan kecepatan aliran udara, serta koefisien perpindahan massa overall sebagai fungsi tinggi bahan isian dan kecepatan aliran udara.

Secara garis besar dapat dikatakan variasi ketinggian bahan isian dan variasi kecepatan aliran udara memberikan efek yang sama terhadap nilai koefisien transfer massa ( $k_{ca}$ ) dan difusivitas efektif ( $D_e$ ). Semakin besar laju alir udara serta semakin tinggi bahan isian maka semakin besar pula nilai koefisien transfer massa ( $k_{ca}$ ) dan difusivitas efektif ( $D_e$ ).

#### Ucapan Terima Kasih

Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada bapak Dr. Ir. Setia Budi Sasongko, DEA selaku dosen pembimbing dan semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian makalah ini.

#### Daftar Notasi

$C_{Ao}$	konsentrasi uap air mula-mula dalam umpan dan udara, ppm
$C_A$	konsentrasi uap air setiap saat dalam udara, ppm
$C_A^*$	konsentrasi uap air dalam udara pada kesetimbangan penyerapan, ppm
$D_p$	diameter partikel, cm
$D_e$	difusivitas efektif, $\text{cm}^2/\text{det}$
$D_t$	diameter kolom, cm
$H$	konstanta Henry
$k_{ca}$	koefisien perpindahan massa overall, $\text{det}^{-1}$
$BM$	berat molekul g/gmol
$N_A$	komponen transfer massa, gmol/det
$x_A$	gr uap air teradsorp/gr adsorben
$v$	kecepatan aliran udara, cm/det
$z$	tinggi bahan isian, cm
$\varepsilon$	porositas bed
$\rho$	densitas, $\text{g}/\text{cm}^3$
$\mu$	viskositas gas, gr/cm.detik
$\Phi$	faktor bentuk
$C_1$	tetapan
$C_2$	tetapan
$C_3$	Tetapan
$K$	Tetapan

#### Daftar Pustaka

- Brown, G. G., 1978, "Unit Operation", p.p. 398-410, John Wiley & Sons Inc., New York
- Mc. Cabe, W.L., Smith, J.C., and Harriot, P., 1989, "Operasi Teknik Kimia", jilid 2, edisi keempat, Erlangga, Jakarta
- Perry, J.H, 1984, "Chemical Engineering Handbook", 6<sup>th</sup> ed., Mc, Graw Hill, New York.
- Sediawan, W. B., dan Prasetya, A., 1997, "Pemodelan dan penyelesaian Numeris dalam Teknik Kimia dengan Pemograman Bahasa Basic dan Fortran
- Treybal, R E., 1980, " Mass-transfer Operation", 3<sup>rd</sup> ed., p.p. 565-612, Mc. Graw Hill, New York.
- [www.matlabcenter.com](http://www.matlabcenter.com), Math 542 Numerical Solutions Of Differential Equations
- (<http://www.mpg.de/~sander/res/henry.html>), R.Sander:Henry'slawconstants